

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННО – ПУЧКОВОЙ АБЛЯЦИИ АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА 1933

Старцев А.А.¹

Руководитель - д.т.н. Литвиненко В.В.²

¹Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина

²Институт электрофизики и радиационных технологий НАН Украины, г.

Харьков, Украина

startsev-olexandr@rambler.ru

Метод модификации поверхности металлов и сплавов путем обработки сильноточными электронными пучками интенсивно развивается наряду с лазерным, ионным, плазменным и др. методами. Облучение металлов и сплавов при этом сопровождается протеканием многих процессов, которые в результате обуславливают изменение физико-химических свойств приповерхностной области. Известным явлением при воздействии сильноточных электронных пучков на металлические поверхности является абляция, заключающаяся в рассеянии материала мишени [1-3] в виде газоплазменного облака. Важность изучения динамики этого процесса представляется таковой, как с точки зрения возможности использования конденсированных продуктов абляционного выброса для получения материалов в метастабильном состоянии, так и для диагностики процессов, происходящих внутри мишени: фазовых превращений, массопереноса, формирования упругих и ударных волн и др.

В качестве объекта исследований был выбран алюминиевый сплав 1933 (1,2 – 2,2% Mg; 5,9 – 6,8% Zn; 0,8 – 1,8 % Cu; 0,1% Mn; 0,66 – 0,2% Fe; 0,1% Si; 0,03 – 0,08% Ti; 0,05% Cr; 0,10 – 0,18% Zr; 0,0001 – 0,02% Be; основа Al, % массовые) [4,5]. Сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu-Zr традиционно применяют в закаленном и искусственно состаренном состоянии. Для фиксации твердого раствора, образованного при высокой температуре, необходимо сравнительно быстрое охлаждение, иначе страдают физико-механические свойства, существенно снижается технологичность. Для обоснования эффективности использования модифицирующего влияния электронного пучка на высокопрочный алюминиевый сплав 1933 необходимо предварительно установить динамику температурного поля в процессе действия импульса облучения. В качестве источника облучения для расчетов был выбран ускоритель МИГ-1 Харьковского физико-технического института НАН Украины, для следующих параметров пучка: энергия~ 0.3 МэВ, длительность~5 мкс, сила тока~ 2 кА, толщина стенки пучка~8 мм, внутренний радиус пучка~25 мм, площадь облучения~ 10 см². Численные расчёты проведены на основе термомеханической модели абляции [6].

Электронно-пучковая абляция имеет пороговый характер. Удельная энергия разрушения (полная энергия падающего электронного потока отнесенная к массе удаленного материала) определяет режим разрушения. Из несложных вычислений по его определению [7], следует, что разрушение будет проходить в смешанном режиме, поскольку удельная энергия разрушения значительно больше скрытой теплоты плавления, но заметно меньше теплоты испарения. Комбинированность механизма сказалась на продуктах абляции сплава, которые были как газообразные, так и жидкие.

Скорость нагревания составляет 10^7 - 10^9 К/с, при этом наблюдается размытие максимума температуры в толще материала, что обусловлено экранированием продуктами разрушения и интенсивными конвективными потоками в расплаве. Тепловой удар вызвал фазовый взрыв в алюминиевом сплаве. Принимая во внимание неоднородность потока электронов, энергия разрушения достигает критического значения локально. Газокапельная фаза сильно экранирует мишень, существенно снижая глубину проплавления, дефокусирует пучок, и стимулирует выбрасывание металла преимущественно в жидкой фазе. Ценностью проведенных численных расчётов является то, что они дали возможность оценить реальную глубину проплавления для сплава 1933, границу между модифицированным и не модифицированным объемом (см. рис. 1), что хорошо соответствует ранее полученным экспериментальным данным при облучении других материалов [3].

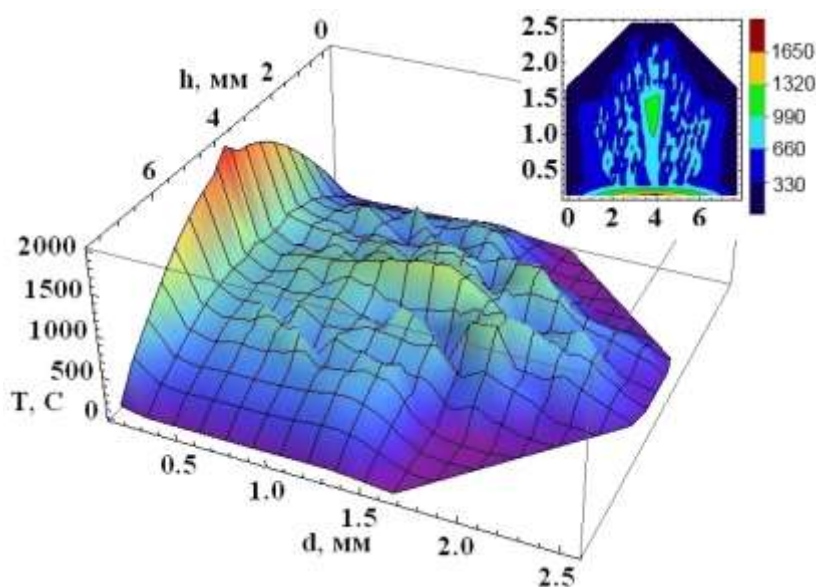


Рис. 1. Распределение температурного поля после облучения, d - глубина проникновения, L – толщина стенки пучка

Для эволюции абляционного интерфейса замечено характерную импульсивность, что вызвано особенностями объемного тепловыделения и

локализации напряжений, результат введения в модель пороговой глубины абляции материала (которая определяется равенством локальной прочности при растяжении и скачка механических напряжений на интерфейсе расплав – твердое тело). Скорость движения интерфейса между модифицированной и неизменной зонами переходит в стационарный режим - до 100 м/с после 3 мкс после начала протекания тока. Высокая скорость охлаждения 10^7 - 10^8 К/с обеспечивает необходимую фиксацию твердого раствора, сильно замедлив в нем нежелательные превращения.

Нам следует отметить тот факт, что модель не описывает корректно процессы эволюции до глубины 20-50 мкм. Стохастичность процесса абляции, пренебрежение рассмотрения полной задачи газодинамики, генерацией плазмы, слоем Кнудсена, являются основными причинами, вызвавшими это ограничение, хотя при приведенных плотностях потока влияние движения пара на движение фронта испарения относительно невелико. Пространственные и температурные абсолютные ошибки в расчетах не превышают 7 мкм и 15 К глубже 50 мкм соответственно. Примененный также конечно-разностный метод Кранка-Николсона, будучи осцилляционным, не всегда удовлетворяет необходимую точность симуляции.

Литература:

1. Ротштейн В.П. Модификация структуры и свойств металлических материалов интенсивными импульсными электронными пучками. Автореферат, 1995, Томск.
2. Ritchie R.H., Crawford O.H. Intense-Beam interaction with matter. Report CONF-8409264—1, 1984, Oak Ridge National Laboratory.
3. Lytvynenko V.V. and others. Simulation of thermal effects of high-current relativistic electron beam on the titanium alloy vt1-0. «Journal of Kharkiv University», «Nuclei, Particles, Fields», 2012, №1001, issue 2/54/, p.104-109.
4. Справочник под общей редакцией академика РАН Фридляндера И.Н. - К.: "КОМИНТЕХ", 2005, 365 с.
5. Mills Kenneth C. Recommended values of Thermophysical Properties for Selected Commercial Alloys. Woodhead Publishing, 2002.
6. Старцев А.А. Структурно-фазовые превращения, обусловленные электронно-пучковой абляцией титана. ХНУ имени Каразина, 2012. - 40 с.
7. Анисимов С.И. и др. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970. - 272 с.